

# DADES SOBRE PALEOCARST I ESPELEOCRONOLOGIA DE LES ILLES BALEARS

per Joaquín GINÉS <sup>1, 2</sup>, Angel GINÉS <sup>1, 2</sup> i Joan J. FORNÓS <sup>1</sup>

## Abstract

The litho-stratigraphic record of the Balearic Islands, basically composed by carbonate rocks, include noticeable paleo-karstic phenomena particularly owing to the complex tectonic structuration experienced by the Western Mediterranean basin all along its geological history. The most outstanding paleokarst features and associated breccia deposits are observed in the Jurassic limestones and, especially, in the postorogenic Upper Miocene carbonate rocks, where abundant funnel-shaped collapse structures (Messinian in age) have tightly conditioned the geomorphological evolution of the eastern coast of Mallorca.

Regarding the karstification occurred in Pliocene and Quaternary times, the islands arise as exceptional scenarios in order to obtain valuable speleochronological data from quite different sources. The base level variations –controlled in turn by oscillations of the sea level–, as well as the evolutionary trends of endemic vertebrates that lived in the Balearic Islands, provide a solid chronological frame to undertake the geomorphologic study of Balearic caves and its sediments. Particularly, the glacio-eustatic oscillations experienced by the Mediterranean Sea remain accurately recorded by means of horizontal paleolevels of phreatic speleothems, mostly corresponding to Upper Pleistocene and Holocene sea-stands. The isotopic investigations (U-Th, <sup>14</sup>C) carried out on these carbonate precipitates, as well as on speleothems in general, have supplied abundant absolute dating which strongly contribute to the chronological assessment of the endokarst evolution undergone in our islands. All the evidences gathered till now seem to place in the Pliocene, and in some cases even before, the main speleogenetic phases occurred in the archipelago. During the Middle and Upper Pleistocene, the caves in the Balearic Islands had only experienced minor morpho-sedimentary modifications embracing –in a significant number of cave sites– the deposition of abundant speleothems together with the emplacement of paleontological deposits that include endemic vertebrate fauna.

## Resum

El registre litostratigràfic de les Balears, integrat bàsicament per roques carbonatades, conté interessants fenòmens paleocàrstics, propiciats per la complexa estructuració tectònica que ha afectat la Mediterrània occidental al llarg de la seva història geològica. Les bretxes i morfologies paleocàrstiques més destacables s'observen en les calcàries del Juràssic i, sobretot, en els materials carbonatats postorogènics del Miocè superior, on nombrosos col·lapses en forma d'embut i d'edat messiniana arriben a condicionar l'evolució geomorfològica de la costa oriental de Mallorca.

Pel que fa a la carstificació ocorreguda al llarg del Pliocè i Quaternari, les illes constitueixen escenaris idonis per a l'obtenció de valuoses dades espeleocronològiques interdisciplinàries. Les variacions del nivell de base –controlades per les oscil·lacions del nivell marí–, així com les tendències evolutives dels vertebrats endèmics que habitaren les nostres illes, proporcionen un marc cronològic excepcional per tal d'emprendre l'estudi geomorfològic de les coves de les Balears i els seus sediments. En particular, les oscil·lacions glacioeustàtiques de la Mediterrània han quedat enregistrades de forma precisa mitjançant la deposició de paleonivells d'espeleotemes freàtics, corresponents sobretot al Pleistocè superior i Holocè. La investigació isotòpica (U-Th, <sup>14</sup>C) d'aquests precipitats minerals, i dels espeleotemes en general, ha subministrat abundants datacions absolutes que han contribuït a la reconstrucció cronològica de l'evolució del nostre endocarst. Les evidències acumulades fins ara situen les fases principals d'espeleogènesi, amb bastant probabilitat, en el Pliocè, i en alguns casos fins i tot abans. Durant el Pleistocè mitjà i superior, les coves de les Balears experimentaren tan sols lleus retoques morfosedimentaris, que inclouen la deposició d'abundants espeleotemes juntament amb dipòsits paleontològics amb fauna vertebrada endèmica.

## Resumen

El registro litoestratigráfico de las Baleares, integrado básicamente por rocas carbonatadas, contiene interesantes fenómenos paleokársticos, propiciados por la compleja estructuración tectónica que ha afectado al Mediterráneo occidental a lo largo de su historia geológica. Las brechas y morfologías paleokársticas más destacables se observan en las calizas del Jurásico y, sobre todo, en los materiales carbonatados postorogénicos del Mioceno superior, donde numerosos colapsos en forma de embudo y de edad Messiniense llegan a condicionar la evolución geomorfológica de la costa oriental de Mallorca.

En cuanto a la karstificación ocurrida a lo largo del Plioceno y Cuaternario, las islas constituyen escenarios idóneos de cara a la obtención de valiosos datos espeleocronológicos interdisciplinarios. Las variaciones del nivel de base –controladas por las oscilaciones del nivel marino–, así como las tendencias evolutivas de los vertebrados endémicos fósiles que habitaron nuestras islas, proporcionan un marco cronológico excepcional a la hora de emprender el estudio geomorfológico de las cuevas de las Baleares y de sus sedimentos. En particular, las oscilaciones glacio-eustáticas del Mediterráneo han quedado registradas de forma precisa mediante la deposición de paleoniveles de espeleotemas freáticos, correspondientes sobre todo al Pleistoceno superior y Holoceno. La investigación isotópica (U-Th, <sup>14</sup>C) de estos precipitados minerales, y de los espeleotemas en general, ha suministrado abundantes dataciones absolutas que han contribuido a la reconstrucción cronológica de la evolución de nuestro endocarst. Las evidencias acumuladas hasta ahora sitúan, con bastante probabilidad, las fases principales de espeleogénesis en el Plioceno, y en algunos casos incluso antes. Durante el Pleistoceno medio y superior, las cuevas de las Baleares experimentaron tan solo ligeros retoques morfo-sedimentarios, que incluyen la deposición de abundantes espeleotemas junto a numerosos depósitos paleontológicos con fauna vertebrada endémica.

<sup>1</sup> Departament de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Palma.

<sup>2</sup> Grup Espeleològic EST. Palma.

## Introducció

El present capítol s'ocuparà dels principals aspectes de l'estudi del carst de les Balears que es relacionen amb el vector temps com són, més concretament, les manifestacions de paleocarst a les nostres illes i les dades espeleocronològiques sobre l'endocarst de l'arxipèlag. Malgrat aquest enfocament balear, cal reconèixer que la majoria d'informacions sobre aquestes matèries es circumscriuen a l'àmbit de Mallorca i, per tant, les referències a les illes menors seran en general minses al llarg de tot el treball.

Pel que fa als fenòmens paleocàrstics, és a dir a les formes i dipòsits lligats a fases de carstificació pre-terites i més o manco llunyanes dins del registre geològic, es farà necessàriament en aquestes planes una revisió més aviat breu. Aquest fet respon bàsicament a dos aspectes ben diferents: per una banda, el caràcter poc espeleològic de les manifestacions paleocàrstiques, consistents sobretot en bretxes i morfologies que apareixen sovint cobertes per formacions geològiques més modernes, així com, per altra banda, les relativament escasses aportacions recents i rellevants sobre aquesta

matèria. En aquest sentit, remetem als possibles interessats a l'exhaustiu treball de FORNÓS *et al.* (1995) sobre el paleocarst de Mallorca, del qual es farà ara una molt breu síntesi, emperò incorporant-hi les informacions subministrades per la bibliografia més actual sobre les diferents illes.

Quant a l'espeleocronologia, el tractament que se li donarà en aquest capítol serà força més extens i es desenvoluparà en la línia d'anteriors treballs que emfatitzaven les possibilitats que es deriven de la investigació de les cavitats existents en les illes carstificades (GINÉS & GINÉS, 1986, 1995). En aquest sentit, les informacions geomorfològiques procedents de les interaccions que es donen entre el modelat càrstic i la dinàmica litoral, resulten freqüentment complementades per valuoses dades cronològiques procedents del registre paleontològic de fauna vertebrada endèmica plio-quadernària, el qual compta amb importants aportacions recents (BOVER *et al.*, 2008, 2010). Però tal vegada és en el camp de la cronologia isotòpica on han tingut lloc contribucions més rellevants durant els darrers anys; esmentarem a

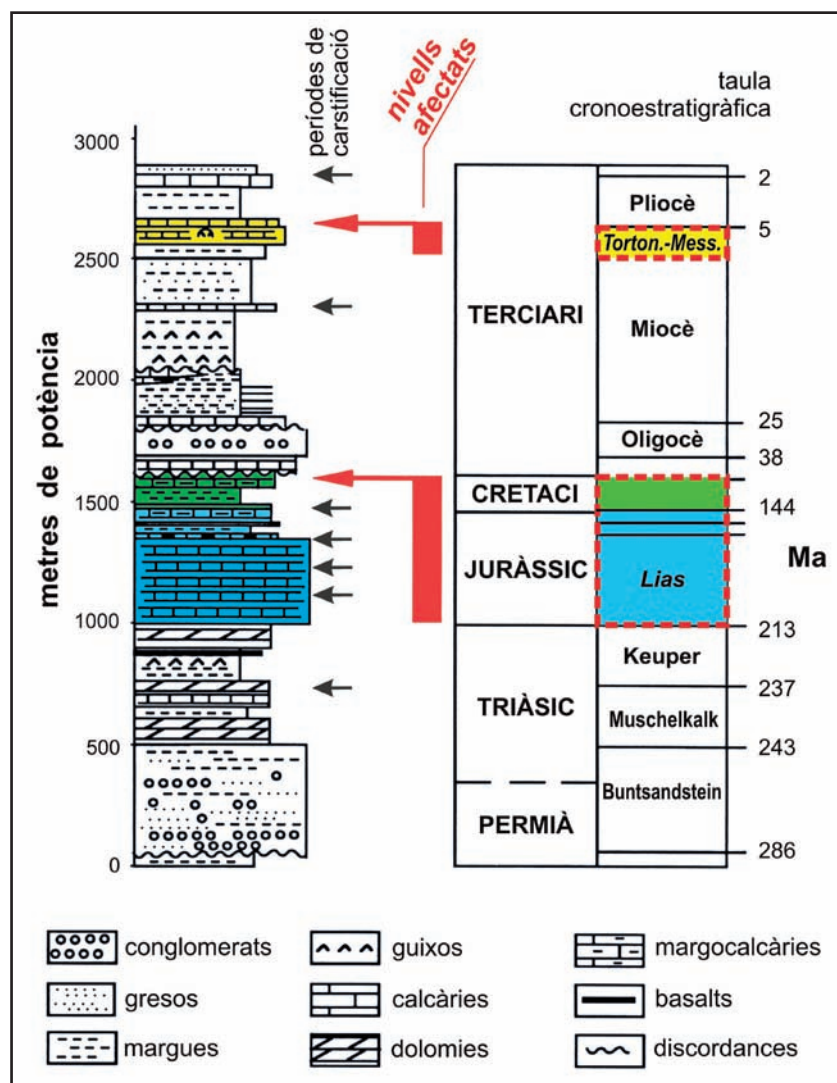


Figura 1: Columna litoestratigràfica sintètica de Mallorca amb indicació dels episodis de paleocarstificació (fletxes) i els principals nivells afectats (columnes verticals vermelles). Modificat a partir de FORNÓS *et al.* (1995).

Figure 1: Synthetic litho-stratigraphical column of Mallorca Island showing the paleokarstification episodes (arrows) and the main affected levels (red vertical bars). Modified from FORNÓS *et al.* (1995).

tall d'exemple les nombroses datacions U-Th efectuades tant sobre espeleotemes vadosos (HODGE, 2004), com en relació a espeleotemes freàtics associats a paleonivells de la Mediterrània corresponents al Pleistocè superior i Holocè (TUCCIMEI *et al.*, 2006, 2010; DORALE *et al.*, 2010). Malgrat que, d'altra banda, les dades paleoclimàtiques obtingudes fins ara són disperses i poc abundants, en línies generals la reconstrucció cronològica de la carstificació ocorreguda durant el Pliocè i el Quaternari compta amb un seguit d'informacions sòlides, que permeten situar en el temps les principals fases d'espeleogènesi de l'endocarst balear. Totes aquestes qüestions relacionades amb la cronologia de la formació de les coves illenques, així com amb l'emplaçament de sediments de diversos tipus, seran tractades en detall en les planes següents.

## Les manifestacions de paleocarst

Aquest concepte, entès com a manifestació morfo-sedimentària dels processos de carstificació ocorreguts durant períodes geològics pretèrits, està caracteritzat per dos aspectes clau: les formes observables corresponen a unes condicions morfogenètiques diferents de les actuals i, a més a més, aqueixes morfologies es troben generalment recobertes per materials geològics més moderns que les roques carbonatades on està emplaçat el paleocarst (BOSÁK, 1989). En el cas de les Balears, la forta estructuració tectònica que ha afectat l'arxipèlag al llarg de la seva història geològica ha ocasionat diversos períodes d'emersió dels materials calcaris, que han donat lloc a successives fases de carstificació (FORNÓS *et al.*, 1995) i, fins i tot, de fossilització de les formes generades. Les morfologies observables, així com els seus reblliments, mostren un ampli ventall de fenòmens disposats al llarg de tota la seqüència sedimentària (Figura 1), en la qual les roques calcàries hi són àmpliament representades.

Malgrat que els estudis sobre el paleocarst balear no són massa nombrosos, existeixen dos casos que han estat estudiats amb bastant detall a l'illa de Mallorca. El primer d'ells es troba representat per les manifestacions paleocàrstiques existents a les calcàries del Juràssic de la Serra de Tramuntana (FORNÓS *et al.*, 1986/87), mentre que el segon correspon al paleocarst desenvolupat als dipòsits escullosos del Miocè superior de la costa oriental de l'illa (FORNÓS, 1999; ROBLEDO & POMAR, 2000; ROBLEDO, 2005). Per a gaudir d'una visió més detallada d'aquestes matèries és recomanable la consulta del treball ja citat de FORNÓS *et al.* (1995).

### EL PALEOCARST DELS DIPÒSITS JURÀSSICS

Quant al Juràssic de Mallorca, amb una potència global de més de 500 m, presenta dues seqüències ben diferenciades (FORNÓS & GELABERT, 1995). La inferior està formada per dolomies, calcàries i bretxes que

corresponen a dipòsits litorals i de plataforma interna, que evolucionen cap a fàcies de plataforma oberta, finalitzant amb un nivell de quarsarenites que ha estat tradicionalment atribuït al Toarcià. Per altra banda, la

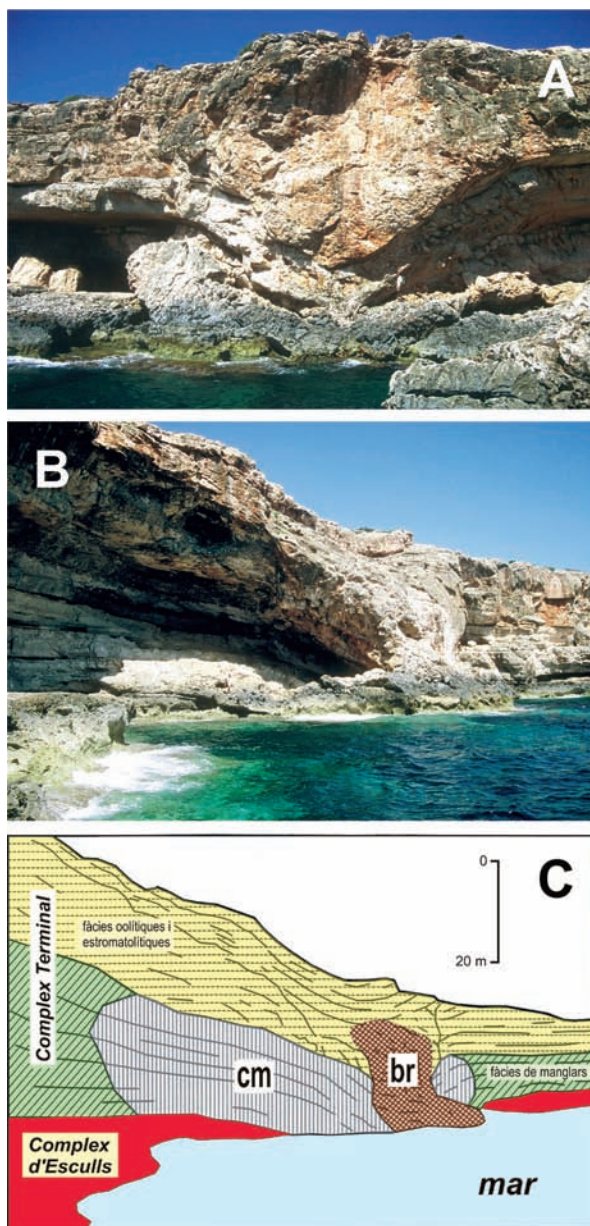


Figura 2: Els fenòmens de paleocarst al Miocè superior del llevant de Mallorca. **A:** col·lapse paleocàrstic que implica una acusada deformació dels materials del Complex Terminal, a prop de la Punta des Savinar (Santanyi). **B:** un altre col·lapse, situat als voltants del Niu de s'Àguila (Santanyi), on s'observen les bretxes de la xemeneia central fortament cimentades, que donen lloc a una prominència de la línia de costa. **C:** esquema interpretatiu del col·lapse que apareix a la foto **B**. (Fotos: Joaquín Ginés).

Figure 2: Paleokarst phenomena in the Upper Miocene rocks of eastern Mallorca. **A:** paleokarstic collapse producing a noteworthy deformation of the Terminal Complex materials, close to Punta des Savinar (Santanyi). **B:** another collapse, located near Niu de s'Àguila (Santanyi), where the well-cemented breccia deposits corresponding to the central chimney are clearly visible, forming a notable prominence in the coastline. **C:** interpretative scheme of the collapse shown in photo **B**. (Photos: Joaquín Ginés).



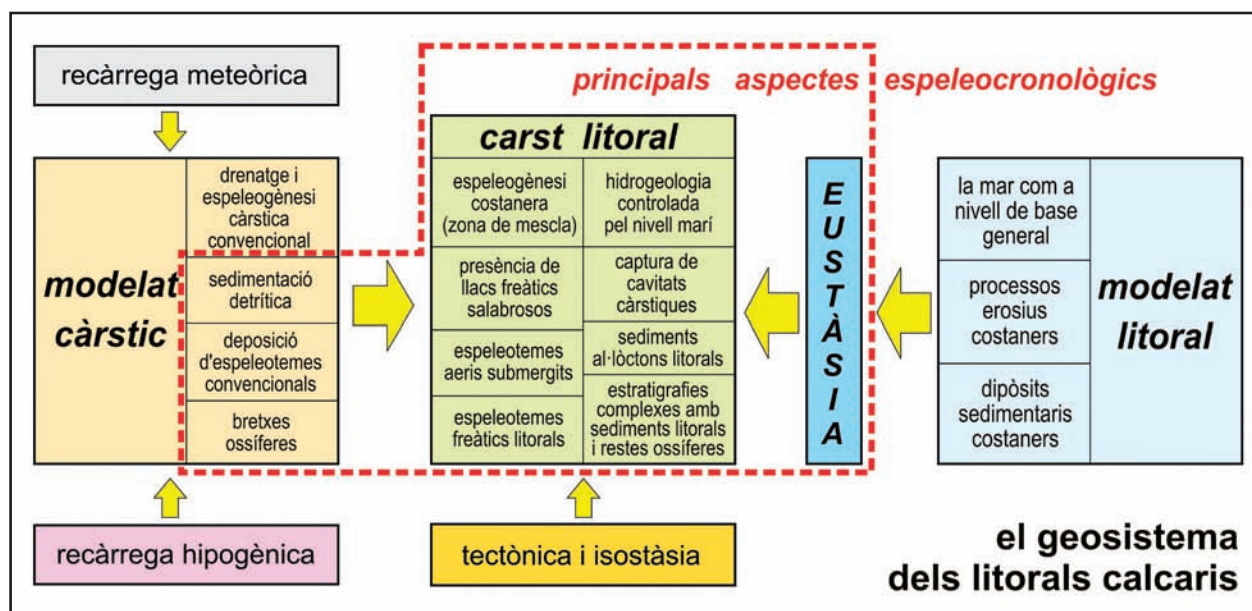


Figura 3: Esquema conceptual del funcionament del geosistema càrstic-litoral i de les seves possibilitats espeleocronològiques, relacionades moltes d'elles amb les oscil·lacions glacio-eustàtiques.

Figure 3: Conceptual scheme on the most significant interactions that affect the littoral karst geosystem and its speleochronological potentialities, many of them related to the glacioeustatic oscillations.

seqüència superior correspon a una sedimentació pelàgica que inclou margues i margocalcàries amb nivells de sílex; aquests dipòsits de la seqüència superior s'inicien al Dogger i continuen amb fàcies cada vegada més pelàgiques fins al Cretaci superior. En aquests moments té lloc l'emersió de l'àrea balear, i fins l'Eocè mitjà no es torna a trobar cap tipus de registre.

El paleocarst desenvolupat en els materials mesozoics –bàsicament en les calcàries del Lias– inclou fissures i cavitats irregulars o seudocilíndriques d'ordre decamètric a mètric, reblides per bretxes heteromètriques que abracen tota la seqüència del Juràssic (sobretot els dipòsits del Lias superior i del Dogger) i inclouen abundants grans de quars procedents dels nivells del Toarcià (FORNÓS *et al.*, 1986/87). El procés de formació d'aquestes morfologies, així com de les masses de bretxes associades, s'ha produït amb posterioritat a la deposició de la seqüència pelàgica mesozoica, ja que abunden els clastos de materials margosos pelàgics on hi destaquen les traces de *Cancellophycus* reomplint els estamentats buits de dissolució. Sembla plausible associar la formació d'aquest paleocarst amb el període d'emersió paleocena, donat que a totes les Balears no s'han trobat materials pertanyents a aquesta edat.

## EL PALEOCARST AL MIOCÈ SUPERIOR

Els materials calcaris del Miocè superior afloren extensament en el sud i llevant de l'illa de Mallorca, on constitueixen un seguit de plataformes tabulars que voregen els relleus de les Serres de Llevant. Aquests afloraments formen, a la línia de costa, penya-segats de fins a 30 m d'alçada que permeten observar espectaculars estructures paleocàrstiques (Figura 2), sobretot al llarg de la costa oriental de l'illa.

En el cas de Mallorca, el Miocè superior està format per fàcies de plataforma carbonatada (FORNÓS & GELABERT, 2004), on és possible distingir dues unitats deposicionals clarament diferenciades: el *Complex d'Esculls*, integrat per calcarenites bioclàstiques i esculls de corall, i el *Complex Terminal* que inclou dipòsits litorals somms amb una gran varietat de fàcies (mangles, planes arenoses, estromatòlits, calcàries oolítiques...). El sostre de la unitat escullosa presenta una clara superfície erosiva que es mostra parcialment carstificada.

En els penya-segats costaners dels municipis de Santanyí i Felanitx són molt freqüents les morfologies relacionades amb fenòmens de subsidència ocasionats per processos de dissolució càrstica (FORNÓS *et al.*, 1995; FORNÓS, 1999; ROBLEDO & POMAR, 2000). En general es tracta de deformacions en forma d'enfonsament, que ressegueixen el contacte entre el *Complex d'Esculls* i el *Complex Terminal* i afecten freqüentment a tot el paquet de la unitat superior (Figura 2a); la unitat inferior escullosa, on es desenvolupen els buits que donen lloc als enfonsaments, tan sols resulta afectada ocasionalment en els seus nivells més elevats. Des del punt de vista morfològic, aquestes estructures paleocàrstiques presenten diverses parts ben individualitzades: a la base, i sempre localitzada al *Complex d'Esculls*, es localitza una cavitat irregular de dimensions variables, la qual mitjançant un conducte en forma de xemeneia connecta l'esmentada cavitat basal amb una depressió sinusoidal superior molt marcada (Figures 2a i 2b). El diàmetre de les deformacions resultants és de mida decamètrica en general, assolint en alguns casos fins i tot el centenar de metres; els pendents de les parets de les depressions solen oscil·lar entre els 20° i els 45°.

La formació de cavitats, per dissolució, i els ulteriors mecanismes de col·lapse que afectaren els materials suprajacents donen lloc a importants processos de for-

mació de bretxes (FORNÓS, 1999; ROBLEDO, 2005). Els materials involucrats en els col·lapses inclouen tot el *Complex Terminal*, afectant fins i tot als seus nivells més alts constituïts per les calcàries oolítiques. Les bretxes resultants són oligomíctiques i presenten clastos molt angulosos, amb unes mides que van des de centímetres fins a més d'un metre; la matriu és en ocasions calcarenítica i calcisilítica, encara que amb freqüència les bretxes mostren una important litificació amb ciment calcític. Precisament, el grau de cimentació de les bretxes que omplen la xemeneia central d'aquestes estructures paleocàrstiques té una repercussió molt evident en la morfologia de la línia de costa (GINÉS, 2000; BALAGUER & FORNÓS, 2004). En aquest sentit, per exemple, resulta habitual que els cossos columnars de bretxes molt cimentades formin prominències més o manco notòries del traçat litoral; en canvi, a ambdós costats de la xemeneia central la dinàmica marina erosiona amb facilitat els paquets més margosos del *Complex Terminal*, que es troben fortament deformats i fracturats en els flancs dels col·lapses (Figures 2b i 2c).

El desenvolupament de les estructures de col·lapse descrites sembla estar originat per l'elevada porositat resultant de la dissolució preferencial de les masses aragonítiques de coralls, fet que hauria provocat el flux subsident de materials més o manco plàstics cap a aquests buits. Aquest procés afectaria sobretot als nivells superiors —el *Complex Terminal*— originant la deformació, trencament i bretxificació d'aquests materials. L'edat del paleocarst és difícil de concretar: el seu inici podria situar-se immediatament després de la deposició del *Complex d'Esculls*, continuant durant la sedimentació i litificació parcial del *Complex Terminal*, corresponent al Messinià. Així mateix, el procés de carstificació pot haver continuat al menys durant el Pliocè.

Finalment cal referir-se a determinats dipòsits de bretxes de gran interès paleontològic, que es poden situar cronològicament al final del Miocè o inici del Pliocè, i que es troben representats tant a Mallorca com a les illes

menors (BOVER *et al.*, 2008). Esmentarem, en el cas de Menorca, les bretxes que reomplen algunes cavitats a les calcàries juràsiques de Punta Nati (al nord de Ciutadella), les quals han proporcionat una interessant associació faunística que inclou un conill de gran talla i una tortuga gegant; pel que fa a Eivissa, cal assenyalar per exemple els rebliments d'antigues cavitats a la zona de Ses Fontanelles (Sant Antoni de Portmany), també amb una fauna característica que inclou entre d'altres dos bòvids, dos rosegadors, un lepòrid, i alguns rèptils. En l'illa de Mallorca, destaca la recent descripció de *Myotragus palomboi*, forma arcaica d'aquest gènere de bòvid, recol·lectada en les bretxes pliocenes del Caló d'en Rafelino, al municipi de Manacor (BOVER *et al.*, 2010).

## Les illes calcàries i l'espeleocronologia

Els territoris insulars integrats de forma majoritària per roques calcàries constitueixen àmbits molt adients de cara a la realització d'investigacions espeleocronològiques (GINÉS & GINÉS, 1986, 1995; GINÉS *et al.*, 2007). Les interaccions entre el modelat càrstic i la dinàmica litoral (Figura 3) introdueixen una interessant component cronològica, relacionada amb les oscil·lacions glacioeustàtiques, que juntament amb d'altres circumstàncies de caire geomorfològic i/o paleontològic contribueixen a situar en el temps l'evolució de l'endocarst. En aquest sentit, les condicions d'insularitat promouen l'evolució diferenciada de la fauna que habita a les illes, de tal manera que les tendències evolutives de certes espècies endèmiques de vertebrats terrestres fòssils queden enregistrades en l'acumulació sedimentària de nombroses coves illenques (ALCOVER *et al.*, 1981). A més a més, cal fer referència als diversos processos de

Figura 4: La Cova Marina des Pont (Manacor) és una cavitat càrstica pràcticament desmantellada per l'erosió marina. L'alçada d'aquest arc natural és aproximadament de 18 m. (Foto: Bogdan Onac).

Figure 4: The Cova Marina des Pont (Manacor) is a karst cave almost totally dismantled by the sea erosion. The height of this natural arch is around 18 m. (Photo: Bogdan Onac).





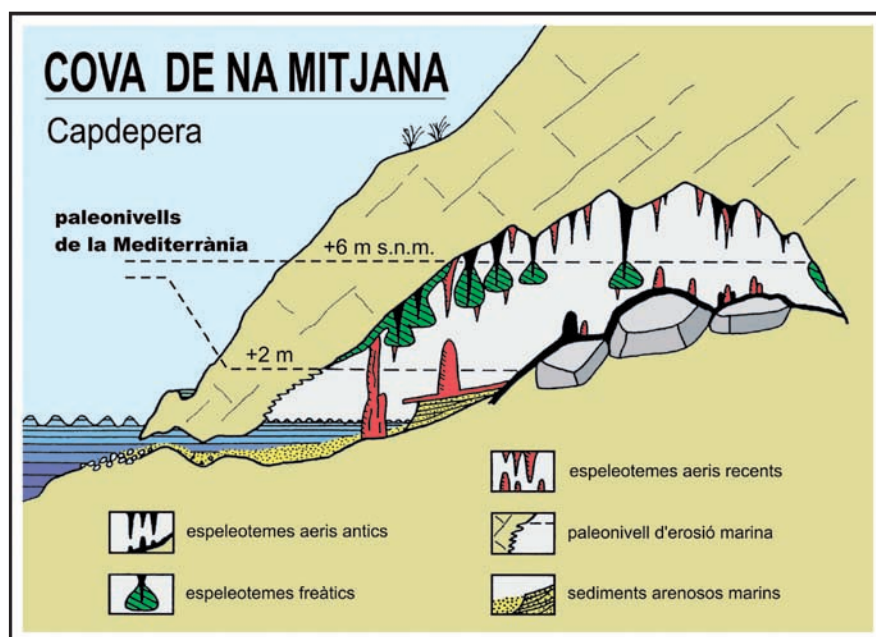


Figura 5: Representació esquemàtica de les morfologies i rebliments d'una cavitat costanera de les Serres de Llevant de Mallorca, relacionats amb les oscil·lacions pleistocèniques del nivell marí. Els espeleotemes freàtics podrien correspondre al penúltim interglacial (estadi isotòpic 7), mentre que la captura de la cova per l'erosió marina correspon probablement a l'últim interglacial (estadi isotòpic 5). Segons GINÉS *et al.* (2007).

Figure 5: Schematic representation of a coastal cave from Serres de Llevant area, in Mallorca Island, showing its morphologies and infillings related to the Pleistocene sea level oscillations. The phreatic speleothems paleolevel may correspond to the penultimate interglacial (MIS 7), whereas the marine capture of the cave probably occurred during the last interglacial (MIS 5). According to GINÉS *et al.* (2007).

deposició d'espeleotemes que, alternant-se amb d'altres mecanismes morfogenètics, confereixen una major potencialitat geocronològica a la investigació de les cavitats balears (GINÉS *et al.*, 1999).

Centrant-nos en aquest apartat en els aspectes geomorfològics i sedimentaris, les possibilitats que es deriven de l'estudi de les zones càrstiques litorals són complexes i prometedores (Figura 3). Per exemple, grava i arenes d'origen marí, emplaçades per la mar o pel vent, es poden introduir dins les coves costaneres i incorporar-se al seu registre sedimentari (GINÉS, 2000). Els exemples disponibles de cavernes que allotgen fossilitzacions al·lòctones d'origen dunar, inclouen acumulacions còniques de materials arenosos dipositades per gravetat en l'interior de cavitats càrstiques. Esmentarem en el cas de l'illa de Mallorca els dipòsits possiblement würmians presents a la Cova de sa Bassa Blanca, a Alcúdia (GINÉS & GINÉS, 1974), així com les arenes dunars del Riss existents a l'entrada del Secret des Moix, a Manacor (GINÉS *et al.*, 1975). A l'illa de la Dragonera, cal referir-se a la duna Riss dipositada a l'interior de la Cova de sa Font (EGOZCUE, 1971), mentre que a Cabrera és obligat esmentar els sediments arenosos de la Cova des Frare, atribuïts al Pleistocè inferior (MATEU *et al.*, 1979). A l'illa de Menorca, la Cova de sa Duna (Alaior) conté dipòsits d'arenas eòliques corresponents al Pleistocè superior (QUINTANA & ARNAU, 2004).

És freqüent, així mateix, observar morfologies d'erosió marina en les entrades de les cavitats litorals, essent possible constatar també que un gran nombre de coves situades a la línia de costa són el resultat de la captura de fenòmens càrstics (Figura 4) per part dels mecanismes d'erosió específics de la franja litoral (MONTORIOL-POUS, 1972; GRÀCIA *et al.*, 2010). Dins d'aquest context, és necessari al·ludir ara a les oscil·lacions del nivell marí durant el Quaternari, les quals porten implícites valuoses informacions cronològiques que faciliten la datació de paleoformes d'erosió litoral o de sediments d'origen marí dotats d'un contingut

faunístic i/o altimetria significatives (CUERDA, 1975; GINÉS, 2000). A més a més, les oscil·lacions eustàtiques no es limiten a afectar el carst com a un simple objecte passiu de la dinàmica costanera (Figura 3); ans al contrari, les vicissituds experimentades pel nivell marí adquireixen un protagonisme actiu, condicionant les zones preferencials d'espeleogènesi gràcies a l'activitat geoquímica associada a la zona de mescla entre aigües dolces i marines (BACK *et al.*, 1984).

Conjugant tots els aspectes enumerats més a dalt, han estat nombroses les aproximacions espeleocronològiques centrades en la geomorfologia càrstico-litoral d'algunes de les illes menors, com Cabrera o Formentera (MONTORIOL-POUS, 1961; MONTORIOL-POUS & TERMES, 1965). També són abundants les publicacions que s'ocupen de la història morfo-sedimentària de les coves del litoral oriental de Mallorca (GINÉS *et al.*, 1975; GINÉS, 2000; GRÀCIA *et al.*, 2001), on s'aporten dades sobre la seva evolució al llarg del Pleistocè mitjà i superior (Figura 5). Per altra banda, i allunyant-nos ara dels ambients litorals illencs, determinades cavitats mallorquines posen en evidència la seva formació d'acord a uns condicionants geomorfològics radicalment diferents dels actuals; alguns fenòmens endocàrstics com l'Avenc de Fra Rafel, a Escorca (TRIAS *et al.*, 1990), o la Cova de Canet, a Esporles (PONS-MOYÀ *et al.*, 1979), ambdós a la Serra de Tramuntana, deixen ben establerta la cronologia pel cap baix pliocènica d'algunes de les cavitats balears.

## El registre paleontològic

L'abundància de cavitats comunicades amb l'exterior —o que ho han estat en el passat— mitjançant obertures més o manco àmplies, que en ocasions actuen com a trampes que afavoreixen l'acumulació de

restes de vertebrats, fan que bona part del registre paleontològic del Plio-Pleistocè balear procedeixi de coves i avencs d'origen càrstic (MOYÀ-SOLÀ & PONS-MOYÀ, 1979; BOVER & ALCOVER, 2005). Cal afegir, en el cas dels ambients insulars, la possibilitat que els vertebrats presentin formes endèmiques que accentuen encara més l'interès de l'estudi de les restes paleontològiques (Figura 6); en aquest sentit, les tendències evolutives de la fauna vertebrada fòssil de les nostres illes presenten un valor geocronològic evident, que s'ha de tenir necessàriament en compte (ALCOVER *et al.*, 1981; BOVER *et al.*, 2008). Per exemple, a les illes de Mallorca i Menorca les línies evolutives de gèneres com *Myotragus*, *Hypnomys* i *Nesiotites* constitueixen informacions cronoestratigràfiques de primer ordre; més concretament, l'evolució del gènere *Myotragus* compta al manco amb sis espècies d'aquest bòvid que abracen des del Pliocè inferior fins a l'Holocè (MOYÀ-SOLÀ *et al.*, 2007; BOVER *et al.*, 2010), amb una successió ben diferenciada en les Gimnèsies (Figura 7).

Des del moment que la gran majoria de jaciments paleontològics plio-pleistocènics de les Balears corresponen a cavitats càrstiques, sovintegen les estratigrafies complexes on s'alternen les bretxes ossíferes amb dipòsits específicament càrstics –com són els espeleotemes– i sediments detrítics de diversa procedència. Un jaciment destacable, en aquest sentit, és la Cova des

Fum (GINÉS & FIOL, 1981), a Sant Llorenç des Cardassar, on es presenta una espectacular bretxa que inclou *Myotragus antiquus* intercalada entre potents colades estalagmítiques i sediments de caràcter litoral (Figura 8); la cronologia de les restes paleontològiques correspondria al límit Plio-Quaternari. Un altre exemple remarcable és la Cova de Canet, a Esporles, que ha subministrat també materials de *M. antiquus*, datats en 2,6 Ma mitjançant paleomagnetisme (PONS-MOYÀ *et al.*, 1979). Les recents troballes de formes arcaïques de *Myotragus*, encara en estudi, a la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor) vindrien a confirmar la cronologia pliocènica de les principals fases d'espeleogènesi que han configurat l'endocarst de Mallorca (GINÉS *et al.*, 2009).

Situats ja en el Pleistocè mitjà i superior, algunes coves costaneres com la Cova de na Barxa (Capdepera) exhibeixen complexes històries morfogenètiques, on és possible constatar l'alternança de bretxes continentals que contenen *Myotragus balearicus* amb processos d'erosió litoral i de deposició d'espeleotemes (ANDREWS *et al.*, 1989). Finalment, cal referir-se als nombrosos jaciments holocènics amb fauna vertebrada endèmica, els quals permeten resseguir l'extinció d'aquestes associacions faunístiques, relacionada amb l'arribada de l'home a les nostres illes devers el segon mil·lenni abans de Crist (ALCOVER *et al.*, 2001; BOVER & ALCOVER, 2003).



Figura 6: Ossos i crani d'una de les formes arcaïques del gènere *Myotragus*, localitzats a les galeries més internes de la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor). La seva cronologia se situa al manco en el Pleistocè inferior i fins i tot abans. (Foto: Miquel Àngel Perelló).

Figure 6: Bones and skull corresponding to an archaic form of the genus *Myotragus*, found in the inner passages of Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor). Their chronology is probably Lower Pleistocene or even so old as uppermost Pliocene. (Photo: Miquel Àngel Perelló).



## La investigació isotòpica dels espeleotemes

Els espeleotemes constitueixen dipòsits excepcionals, tant per l'especificitat del seu ambient deposicional com per la seva potencialitat de cara a les investigacions de geologia isotòpica. Aquestes es concreten, sobretot, en les grans possibilitats de datació radiomètrica que ofereixen els espeleotemes, així com en l'obtenció de dades paleoclimàtiques relacionades amb anàlisis d'isòtops estables.

En el nostre àmbit geogràfic es disposa de relativament abundants datacions absolutes d'espeleotemes, tant de caràcter vadós (estalagmites, colades...) com de gènesi freàtica lligada a antics nivells de la Mediterrània. Les informacions isotòpiques de caire paleoclimàtic són fins el moment més aviat escasses, tal i com es veurà tot seguit. En tots els casos, les informacions disponibles se centren de manera exclusiva a l'endocarst de l'illa de Mallorca.

## LES DATACIONS D'ESPELEOTEMES VADOSOS

La possibilitat d'obtenir datacions absolutes a partir de mostres d'espeleotemes, mitjançant mètodes com les sèries de l'urani, deixa obert un camp suggestiu per a la consecució de dades espeleocronològiques precises sobre les coves càrstiques de les Balears i la seva evolució (GINÉS *et al.*, 1999).

Les investigacions efectuades fins ara, utilitzant el mètode U-Th, s'han centrat en la datació de colades associades a jaciments paleontològics del Pleistocè mitjà i superior (ANDREWS *et al.*, 1989), així com en la datació de dipòsits estalagmítics de diverses coves costaneres, sobretot del llevant de Mallorca (HODGE, 2004; HODGE *et al.*, 2008). També han estat datades algunes estalactites i/o columnes que serveixen de suport a posteriors cristallitzacions d'origen freàtic (HENNIG *et al.*, 1981; GINÉS *et al.*, 1999; VESICA *et al.*, 2000; TUCCIMEI *et al.*, 2010, 2011). En total han estat publicades més de 50 datacions d'espeleotemes aeris que abracen des dels moments postglacials més recents fins als 486 ka BP,

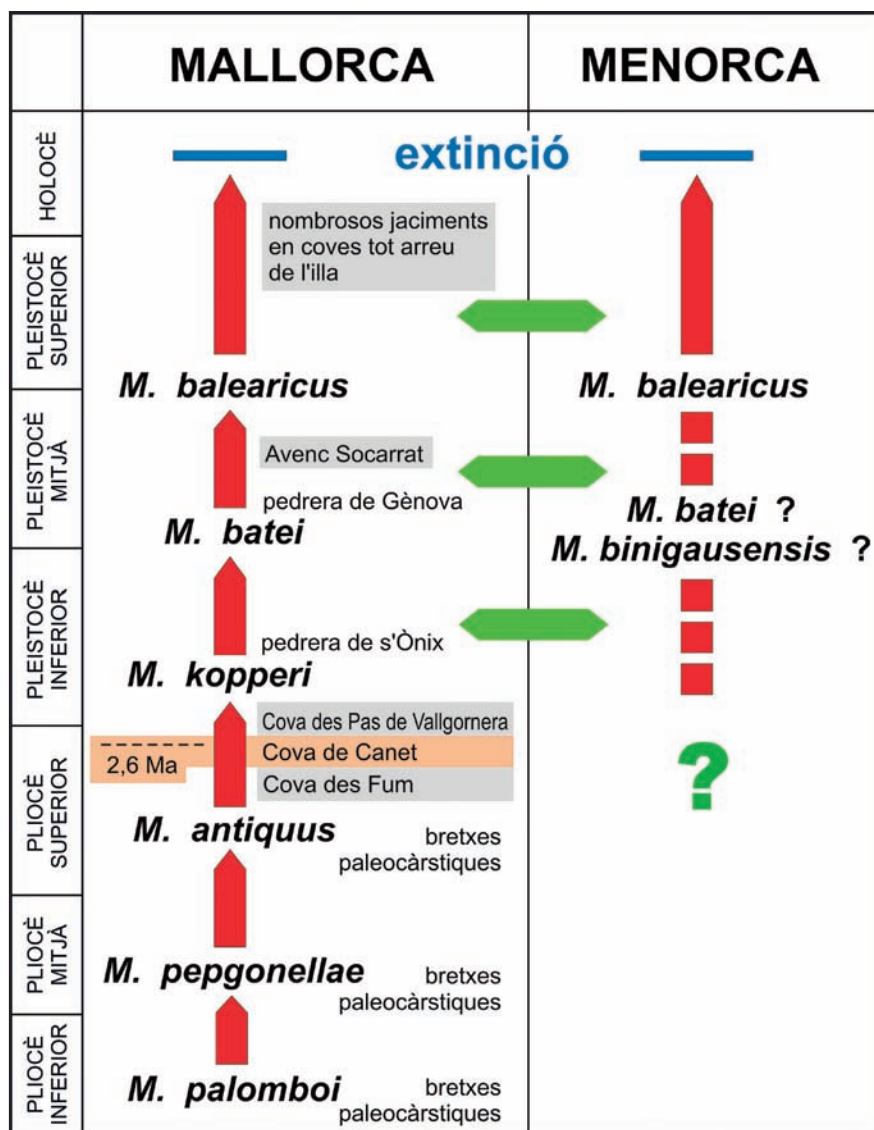


Figura 7: Línies evolutives del gènere *Myotragus* a les illes de Mallorca i Menorca, amb indicació de la seva cronologia. Basat en BOVER *et al.* (2010) i MOYÀ-SOLÀ *et al.* (2007).

Figure 7: Evolutionary lines of the *Myotragus* genus, endemic bovidae from the islands of Mallorca and Menorca, with indication of their chronology. Based on BOVER *et al.* (2010) and MOYÀ-SOLÀ *et al.* (2007).



## COVA DES FUM

Sant Llorenç des Cardassar

Perfil E - W

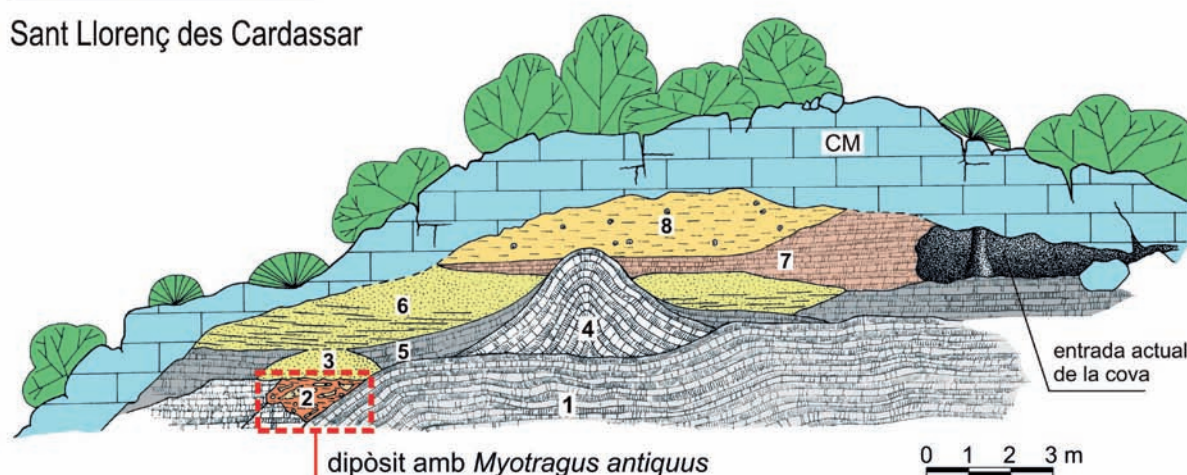


Figura 8: Seqüència estratigràfica observable a una cavitat del llevant de Mallorca (modificat a partir de GINÉS & Fiol, 1981). 1: colada basal. 2: bretxa ossífera amb restes de *Myotragus antiquus* (límit Plio-Quaternari). 3 i 6: calcarenites d'origen marí. 4, 5 i 7: altres generacions de colades. 8: llims amb gas·teròpodes terrestres.

Figure 8: Stratigraphic sequence from a cave in eastern Mallorca (modified from GINÉS & Fiol, 1981). 1: basal flowstone. 2: bone breccia including remains of the bovidae *Myotragus antiquus*, whose age correspond presumably to the Plio-Quaternary transition. 3 & 6: eolian calcarenites. 4, 5 & 7: successive flowstone generations. 8: silty deposits with terrestrial gastropods.

ja en els límits del mètode de datació (Figura 9). La major part de les dades obtingudes es concentren entre el moment actual i els 165 ka BP, amb moltes menys datacions distribuïdes entre els 195 i els 486 ka BP. Encara que les dades disponibles són sens dubte escasses, i amb poc valor estadístic, queda prou documentada la precipitació d'espeleotemes en condicions vadoses durant els períodes més freds del Pleistocè superior i mitjà, corresponents als estadis isotòpics 2, 4 i 6 (l'última i penúltima glaciacions).

L'estudi geocronològic dels espeleotemes de les coves litorals presenta interessants particularitats, que es deriven de les relacions altimètriques d'aquests dipòsits respecte de l'actual o passats nivells marins. Per exemple, HODGE *et al.* (2008) documenten un hiatus en el creixement d'una estalagmita de la Cova de Cala Falcó, a Manacor, provocat per la transgressió marina corresponent al subestadi isotòpic 5a. Per altra banda, la presència d'abundants estalagmites i altres tipus d'espeleotemes aeris que es troben submergits a diferents fondàries en els llacs salabrosos de les coves litorals illenques, representen evidències de regressions marines corresponents als esdeveniments freds pleistocènics; les investigacions dirigides cap a aquest vessant del coneixement de la història del nivell marí, compta de moment amb molt poques datacions, sempre efectuades sobre espeleotemes recol·lectats al voltant del nivell actual de la Mediterrània (HENNIG *et al.*, 1981; TUCCIMEI *et al.*, 2010).

### L'ESTUDI DELS ESPELEOTEMES FREÀTICS

Al darrer quart del passat segle es va encetar l'estudi dels espeleotemes freàtics de les coves de la costa oriental de Mallorca (GINÉS & GINÉS, 1974; GI-

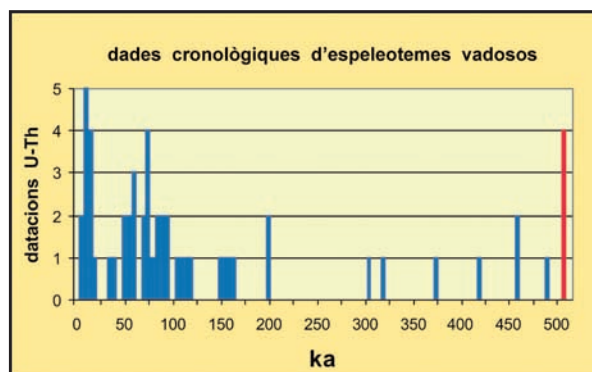


Figura 9: Distribució de freqüències de les datacions U-Th efectuades sobre espeleotemes aeris (estalagmites, colades, etc) de Mallorca, agrupades en intervals d'edat de 5 ka. La barra vermella correspon a datacions fora dels límits del mètode U-Th, o amb relacions isotòpiques inconsistentes. Veure explicacions addicionals en el text.

Figure 9: Frequency distribution of available U-Th datings performed on aerial speleothems (stalagmites, flowstone, etc) from Mallorca, grouped in age intervals of 5 ka. The red bar corresponds to datings out of the limits of the U-Th method, or showing non-consistent isotopic ratios. See additional explanations in the text.

NÉS *et al.*, 1975), els quals delimiten paleonivells assolits per la superfície de les aigües freàtiques, dins cavitats properes a la línia litoral, en relació amb les fluctuacions glacioeustàtiques marines. L'interès primordial d'aquests dipòsits rau en el següent fet: les estabilitzacions del nivell de la Mediterrània –tant transgressives (interglacials) com regressives (episodis freds)– han quedat enregistrades a l'interior de nombroses caver·nes mitjançant alineacions horitzontals d'espeleotemes freàtics (Figures 10 i 11a), que es localitzen respectivament per damunt i per davall del nivell marí actual

(GINÉS *et al.*, 1981b; GINÉS, 2000; TUCCIMEI *et al.*, 2006). Les cristal·litzacions freàtiques presenten una gran variabilitat morfològica i textural, mentre que la mineralogia es presenta calcítica i/o aragonítica (POMAR *et al.*, 1976, 1987; GINÉS, 2000; GINÉS *et al.*, 2005), circumstància que pot tenir un clar significat geoquímic i paleoambiental.

En el cas de Mallorca s'han constatat nombrosos paleonivells de cristal·litzacions freàtiques, situades entre les cotes +46 m i -23 m respecte al present nivell de la Mediterrània (GINÉS, 2000). En alguns treballs (GINÉS & GINÉS, 1974; GINÉS *et al.*, 1981a) s'ha apuntat la possibilitat de correlacionar altimètricament aquestes

cristal·litzacions amb antigues línies de costa pleistocèniques, reconegudes a l'exterior mitjançant l'estudi estratigràfic i paleontològic de les platges fòssils de la nostra illa, ben conegudes gràcies a les investigacions de quaternaristes de renom com CUERDA (1975); en aquesta línia d'hipòtesi, els paleonivells més elevats d'espeleotemes freàtics correspondrien probablement a episodis interglacials atribuïbles al Pleistocè mitjà. Però, a part de les esmentades correlacions altimètriques, les possibilitats que ofereixen els espeleotemes freàtics de cara a la seva datació radiomètrica els converteixen en un valuós registre per a un millor coneixement de la història quaternària del nivell marí.



Figura 10: Espectacular sobrecreixement de cristal·litzacions freàtiques desenvolupat sobre una columna a la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor). El màxim gruix observable al bell mig d'aquest espeleotema freàtic correspon al nivell marí mitjà durant el darrer interglacial (subestadi isotòpic 5e). (Foto: Antoni Merino).

Figure 10: Conspicuous overgrowth of phreatic crystallizations developed on a column in Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor). The maximum thickness in the middle of this phreatic speleothem corresponds to the mean sea level during the Last Interglacial (MIS 5e). (Photo: Antoni Merino).

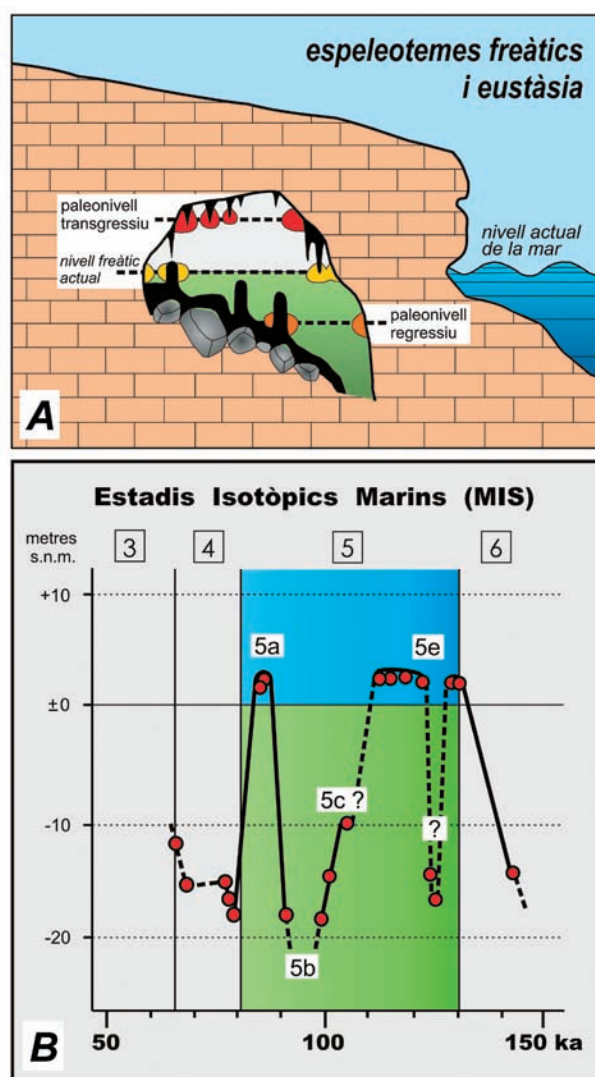


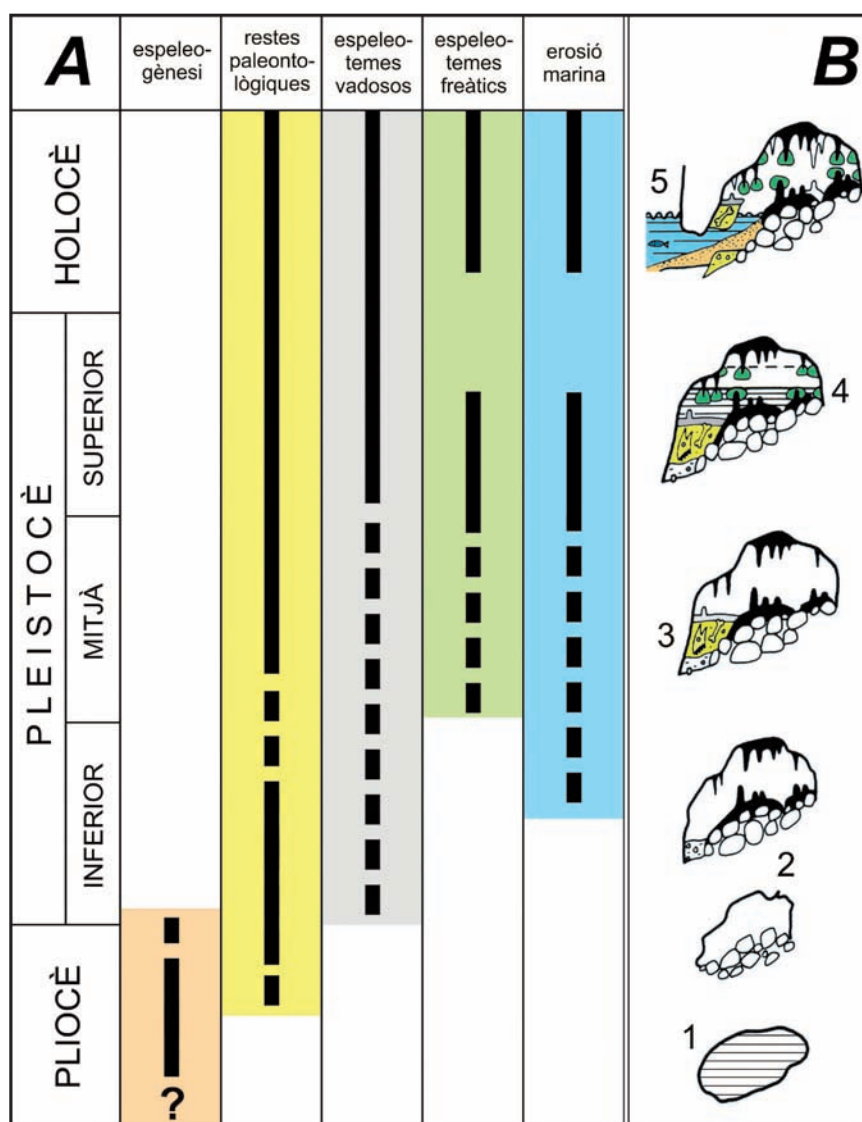
Figura 11: Els espeleotemes freàtics i les seves possibilitats geocronològiques. **A:** esquema interpretatiu de la distribució espacial de les alineacions de cristal·litzacions freàtiques. **B:** corba eustàtica del darrer interglacial construïda a partir de datacions U-Th d'espeleotemes freàtics de coves mallorquines (basat en TUCCIMEI *et al.*, 2006).

Figure 11: The phreatic speleothems and its geochronological implications. **A:** conceptual scheme about the spatial distribution of phreatic crystallizations alignments. **B:** eustatic curve of the Last Interglacial deduced from U-Th datings of phreatic speleothems collected in Mallorcan caves (based on TUCCIMEI *et al.*, 2006).



Figura 12: Síntesi cronològica idealitzada de l'evolució morfo-sedimentària de l'endocarsl litoral de Mallorca. **A:** reconstrucció temporal dels principals processos morfogenètics implicats i dels rebliments associats. **B:** aparença morfològica general de les coves en els diferents moments de la seva evolució. 1: excavació inicial de buits freàtics; 2: els processos d'esfondrament de les voltes alternen amb fases de deposició d'espeleotemes vadosos; 3: s'acumulen restes fòssils de vertebrats endèmics a les zones d'entrada d'algunes coves; 4: diversos episodis de generació d'espeleotemes freàtics es corresponen amb paleonivells de la Mediterrània; 5: mecanismes recents d'erosió i sedimentació marina afecten les cavitats costaneres.

Figure 12: Idealized chronological synthesis concerning the morphological and sedimentary evolution of the littoral endokarst from Mallorca Island. **A:** temporal reconstruction of the main morphogenetic processes and the associated cave infillings. **B:** general morphological appearance of the caves in different moments of their evolution. 1: excavation of an initial network of phreatic voids; 2: breakdown processes alternate with different phases of vadose speleothems deposition; 3: paleontological remains of endemic vertebrates accumulate at the entrance parts of many caves; 4: several deposition episodes of phreatic speleothems occur corresponding with high Mediterranean sea paleolevels; 5: recent erosional and sedimentary mechanisms, marine in origin, affect the caves that are closest to the coastline.



Rere els estudis primerencs sobre aquesta matèria, fonamentalment de caire geomorfològic i cristal·logràfic (GINÉS & GINÉS, 1974; POMAR *et al.*, 1976, 1979; GINÉS *et al.*, 1981a, 1981b), s'han portat a terme fins al present quatre successius programes de datació absoluta d'aquests dipòsits, mitjançant el mètode U-Th. Les primeres campanyes de datació es feren utilitzant tècniques d'espectrometria alfa (HENNIG *et al.*, 1981; GINÉS & GINÉS, 1993; TUCCIMEI *et al.*, 1998, 2000; GINÉS, 2000), mentre que en les darreres s'han emprat tècniques d'espectrometria de masses (TIMS i MC-ICPMS) que permeten obtenir dades molt més acurades i precises (TUCCIMEI *et al.*, 2006, 2010; DORALE *et al.*, 2010). En total s'han publicat al llarg dels darrers trenta anys prop d'un centenar de datacions, que han fet possible la reconstrucció d'una corba eustàtica bastant detallada pel que fa al rang d'edat de 60 a 150 ka BP. Aquesta corba (Figura 11b) deixa ben evident l'existència –dins del darrer interglacial– d'un mínim de dos episodis amb un nivell de la Mediterrània superior a l'actual, concretament els subestadis isotòpics 5a i 5e, encara que aquest darrer subestadi sembla haver estat interromput per una

davallada sobtada del nivell de la mar (TUCCIMEI *et al.*, 2006; DORALE *et al.*, 2010). Les taxes d'ascens i descens del nivell marí deduïdes de l'altimetria de les mostres datades són bastant elevades, fins i tot superiors als 4 m/ka.

Convé esmentar, així mateix, les datacions d'espeleotemes de la Cova de sa Bassa Blanca (Alcúdia) efectuades per GRÜN (1985, 1986) utilitzant les tècniques d'ESR (Electron Spin Resonance); aquest autor proposa que la complexa seqüència analitzada, majoritàriament d'origen freàtic, abraça un lapse de temps que va des de 700 a 200 ka BP. Altres intents de datació ESR d'espeleotemes freàtics, procedents de diferents localitats mallorquines, han proporcionat resultats poc consistents (GINÉS, 2000).

Finalment ens referirem a les cristal·litzacions freàtiques subactuals, que s'observen al voltant de la present franja de fluctuació dels llacs salabrosos de les coves litorals de Mallorca. Aquests dipòsits han estat datats mitjançant U-Th i <sup>14</sup>C, amb la intenció de confirmar la seva cronologia postglacial i obtenir dades cronològiques sobre el nivell de la Mediterrània durant l'Holocè.



Les datacions obtingudes posen en evidència un nivell marí similar a l'actual des dels 2.800 anys BP fins a l'actualitat (TUCCIMEI *et al.*, 2010, 2011), precedit per una estabilització de signe negatiu (aprox. -1 m) documentada per les restes arqueològiques existents a la Cova Genovesa, al municipi de Manacor.

## ALGUNES DADES PALEOCLIMÀTIQUES

Encara que no són gaire nombroses, es disposa d'algunes dades de caire paleoclimàtic procedents d'anàlisis dels isòtops estables del carboni i de l'oxigen, efectuats a partir d'espeleotemes de Mallorca. Les informacions disponibles són bastant fragmentàries en el cas de les cristal·litzacions freàtiques, donat que aquest tipus de dipòsits té un caràcter molt discontinu –espacial i temporalment– per mor de la tendència fluctuant del nivell marí pleistocè; d'altra banda, pel que fa als espeleotemes vadosos, es disposa tan sols d'unes poques sèries d'anàlisis realitzats especialment sobre estalagmites de coves del llevant de l'illa.

Començant per aquests darrers dipòsits –els espeleotemes vadosos– les investigacions geocronològiques i paleoambientals realitzades per HODGE (2004) constitueixen les úniques dades exhaustives sobre els isòtops estables en estalagmites de cavitats mallorquines, com són la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor), la Cova de Cala Falcó i la Cova de Cala Varques A (Manacor), així com la Cova Tancada (Alcúdia). Aquest autor aporta anàlisis dels isòtops del carboni i de l'oxigen que abracen el rang d'edat de 240 a 48 ka BP, detectant en el decurs del darrer interglacial (concretament dins el subestadi 5e; 130 a 120 ka BP) una tendència de canvi des de condicions pluvials cap a un règim de marcada aridesa. Durant el subestadi 5a (85 a 80 ka BP) s'observa una molt acusada variabilitat climàtica, amb canvis tèrmics i pluviomètrics substancials i molt sobtats que tenien lloc en lapsos de temps de menys de 200 anys. Els estadis 4 i 3 suposen esdeveniments de caràcter fred i amb escasses precipitacions. En general, les estalagmites analitzades presenten taxes de creixement molt elevades, de l'ordre de 0,1 a 0,4 mm/any, però abraçant espais de temps relativament curts.

Quant als espeleotemes freàtics, cal esmentar les informacions subministrades per VESICA *et al.*, (2000), on es documenten composicions isotòpiques pesades (valors elevats de  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^{13}\text{C}$ ) en cristal·litzacions corresponents a l'últim interglacial (estadi 5). Aquest fet és relacionat pels citats autors amb una component important d'aigua marina en el sistema geoquímic de les aigües freàtiques litorals, associada a condicions climàtiques d'aridesa creixent. En aquest mateix sentit, la presència d'espeleotemes freàtics d'aragonita, precipitats durant el subestadi 5e, estaria afavorida per les temperatures elevades que caracteritzen els moments interglacials (POMAR *et al.*, 1976, 1987), les quals es tradueixen en els jaciments exteriors en l'aparició de la fauna malacològica termòfila pròpia de l'Eutirrenià (CUERDA, 1975); així mateix, continguts elevats de Mg i Sr en les aigües freàtiques, com a conseqüència d'una recàrrega meteorològica dèbil, podrien també propiciar la deposició de cristal·litzacions d'aragonita, refermant el significat pa-

leoclimàtic de la mineralogia d'aquests dipòsits (GINÉS, 2000; VESICA *et al.*, 2000). També s'aporten dades d'isòtops estables en un recent treball geocronològic sobre els espeleotemes freàtics subactuals del sud i llevant de Mallorca (TUCCIMEI *et al.*, 2011).

Per tal de finalitzar, ens referirem a l'estudi que CSOMA *et al.* (2006) varen efectuar a partir d'un sondeig parietal de 122 cm de longitud, procedent de la Cova de sa Bassa Blanca (Alcúdia), perforat a una alçada de 8 m per sobre de l'actual nivell marí. La complexa seqüència analitzada inclou fases d'estalagmitització vadosa, alternant amb cristal·litzacions d'origen freàtic. Els resultats obtinguts detecten una covariació positiva dels valors de  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^{13}\text{C}$  en els espeleotemes aeris, degut a la seva deposició durant episodis climàtics freds. La presència d'aragonita en els dipòsits d'origen freàtic és atribuïda a episodis caracteritzats per una recàrrega meteorològica reduïda durant determinats esdeveniments interglacials.

## Conclusions

A més de les carstificacions antigues observables a la columna estratigràfica de l'arxipèlag balear, a partir del Miocè superior es comença a configurar el modelat actual de les roques carbonatades de les nostres illes. Un primer esdeveniment important ve representat pel paleocarst messinià que es pot observar sobretot al llarg de la costa oriental de Mallorca; la seva empremta en la mesomorfologia de la línia de costa és encara ben palesa.

Durant el Pliocè i el Quaternari les illes es veuen sotmeses a l'actuació de diversos modelats, la interrelació dels quals resulta evident a la franja litoral on interactuen el sistema d'erosió càrstic amb la dinàmica costanera. Dins d'aquest context, els medis morfològics i sedimentaris constituïts per les coves de les Balears resulten escenaris ideals per a les investigacions geocronològiques interdisciplinàries. En el cas de Mallorca, on s'han centrat la major part d'estudis sobre aquestes matèries, cal destacar les dades aportades per algunes complexes seqüències estratigràfiques que inclouen bretxes ossíferes de fauna vertebrada plio-pleistocènica, intercalades entre episodis de deposició d'espeleotemes i que, sovint, es barregen amb sediments i morfologies d'erosió litoral (Figura 8). Les tècniques actuals de datació absoluta i geologia isotòpica ( $^{14}\text{C}$ , ESR, paleomagnetisme, isòtops estables i, sobretot, el mètode U-Th de datació radiomètrica) han permès precisar més el marc cronològic i paleoambiental on s'ubiquen els fenòmens, interpretats en primera instància tan sols a partir d'evidències geomorfològiques i estratigràfiques. Així mateix, les línies evolutives de la fauna vertebrada endèmica del Plio-Pleistocè balear contribueixen de manera sòlida a la construcció d'aquest marc cronològic precís. Una menció especial mereixen les possibilitats que es deriven de l'estudi dels espeleotemes freàtics, per tal d'aproximar-se a la reconstrucció detallada de la història del nivell de la Mediterrània durant el Pleistocè mitjà i superior i també l'Holocè.

El conjunt de dades espeleocronològiques disponibles actualment sobre l'illa de Mallorca (Figura 12), sug-

gereix que l'edat de les fases principals de carstificació i espeleogènesi que configuraren l'endocarst mallorquí es remunten, amb tota probabilitat, al Pliocè o fins i tot a la transició Miocè-Pliocè. Al llarg del Quaternari, l'evolució de les cavitats ha estat important degut sobretot a l'actuació dels mecanismes d'esfondrament de les voltes, així com a successives etapes d'estalagmitització. Durant el Pleistocè mitjà i superior les cavitats càrstiques han experimentat una evolució morfològica escassa, que es limita en general a fossilitzacions autòctones (espeleotemes vadosos, espeleotemes freàtics) o al·lòctones (bretxes ossíferes, materials detrítics d'origen marí, dunar o edàfic) relacionades molt sovint amb les oscil·lacions glacioeustàtiques de la Mediterrània. El registre sedimentari Holocè de les coves illenques permet reconstruir la data de l'arribada de l'home, devers el segon mil·lenni abans de Crist, i documentar la consegüent extinció dels conjunts faunístics endèmics.

## Agraïments

L'estudi dels espeleotemes freàtics de Mallorca s'ha beneficiat de les aportacions efectuades per Jeffrey Dorale, Bogdan Onac, Michele Soligo, Paola Tuccimei, Mark Van Strydonck i Igor M. Villa. Pel que fa a la paleontologia, les informacions subministrades per Pere Bover ens han estat molt valuoses. Cal agrair a Antoni Merino, Bogdan Onac i Miquel Àngel Perelló les facilitats brindades per a la reproducció d'algunes fotografies incloses en aquestes planes. El present treball queda emmarcat dins del projecte de recerca finançat pel Ministerio de Ciencia e Innovación, CGL2010-18616/BTE.

## Bibliografia

ALCOVER, J.A.; MOYÀ-SOLÀ, S. & PONS-MOYÀ, J. (1981): *Les quimeres del passat. Els vertebrats fòssils del Pliocè-Quaternari de les Balears i Pitiüses*. Editorial Moll. Monografies Científiques, 1. 261 pp. Palma.

ALCOVER, J.A.; RAMIS, D.; COLL, J. & TRIAS, M. (2001): Bases per al coneixement del contacte entre els primers colonitzadors humans i la naturalesa de les Balears. *Endins*, 24: 5-57.

ANDREWS, J.N.; GINÉS, A.; PONS-MOYÀ, J.; SMART, P.L. & TRIAS, M. (1989): Noves dades sobre el jaciment paleontològic de la Cova de na Barxa (Capdepera, Mallorca). *Endins*, 14-15: 17-25.

BACK, W.; HANSHAW, B.B. & VAN DRIEL, J.N. (1984): Role of groundwater in shaping the eastern coastline of the Yucatan Peninsula, Mexico. In: LA FLEUR, R.G. (ed.) *Groundwater as a Geomorphic Agent*. Allen & Unwin Inc. 281-293. Boston.

BALAGUER, P. & FORNÓS, J.J. (2004): Influencia de los paleocolapsos cársticos del Mioceno superior en la evolución actual de la línea de costa del S y SE de Mallorca. In: BENITO, G. & DÍAZ-HERRERO, A. (eds.) *Contribuciones recientes sobre Geomorfología*. Actas de la VIII Reunión Nacional de Geomorfología, Toledo. SEG y CSIC. 1: 337-345. Madrid.

BOSÁK, P. (ed.) (1989): *Paleokarst. A systematic and regional review*. Academia, Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences. 725 pp. Praga.

BOVER, P. & ALCOVER, J.A. (2003): Understanding Late Quaternary extinctions: the case of *Myotragus balearicus* (Bate, 1909). *Journal of Biogeography*, 30 (5): 771-781.

BOVER, P. & ALCOVER, J.A. (2005): Catàleg de dipòsits amb *Myotragus* a les Illes Balears. In: ALCOVER, J.A. & BOVER, P. (eds.) *Insular vertebrate evolution: the palaeontological approach*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 12: 51-58. Palma.

BOVER, P.; QUINTANA, J. & ALCOVER, J.A. (2008): Three islands, three worlds: paleogeography and evolution of the vertebrate fauna from the Balearic Islands. *Quaternary International*, 182: 135-144.

BOVER, P.; QUINTANA, J. & ALCOVER, J.A. (2010): A new species of *Myotragus* Bate, 1909 (*Artiodactyla*, *Caprinae*) from the Early Pliocene of Mallorca (Balearic Islands, western Mediterranean). *Geol. Mag.*, 147 (6): 871-885.

CSOMA, A.E.; GOLDSTEIN, R.H. & POMAR, L. (2006): Pleistocene speleothems of Mallorca: implications for palaeoclimate and carbonate diagenesis in mixing zones. *Sedimentology*, 53: 213-236.

CUERDA, J. (1975): *Los tiempos cuaternarios en Baleares*. Diputación Provincial de Baleares. Instituto de Estudios Balearicos. 304 pp. Palma.

DORALE, J.A.; ONAC, B.P.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, J.; GINÉS, A.; TUCCIMEI, P. & PEATE, D.W. (2010): Sea-level highstand 81,000 years ago in Mallorca. *Science*, 327: 860-863.

EGOZCUE, J.J. (1971): Estudio del cono de materiales alóctonos de la Cova de sa Font. *Speleon*, 18: 49-53.

FORNÓS, J.J. (1999): Karst collapse phenomena in the Upper Miocene of Mallorca (Balearic islands, Western Mediterranean). *Acta Geologica Hungarica*, 42 (2): 237-250.

FORNÓS, J.J. & GELABERT, B. (1995): Litologia i tectònica del carst de Mallorca / Lithology and tectonics of the Majorcan karst. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (eds.) *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 27-43. Palma.

FORNÓS, J.J. & GELABERT, B. (2004): Baleares. In: VERA, J.A. (ed.) *Geología de España*. Sociedad Geológica de España - IGME. 450-464. Madrid.

FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J. & RODRÍGUEZ-PEREA, A. (1995): El paleocarst a Mallorca / Paleokarst in Mallorca. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (eds.) *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 113-123. Palma.

FORNÓS, J.J.; RODRÍGUEZ-PEREA, A. & ARBONA, J. (1986/87): Brechas y paleokarst en los depósitos jurásicos de la Serra de Tramuntana de Mallorca. *Acta Geológica Hispánica*, 21-22: 459-468.

GINÉS, A. & FIOL, L.A. (1981): Estratigrafía del yacimiento de la Cova des Fum (Sant Llorenç, Mallorca). *Endins*, 8: 25-42.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1974): Consideraciones sobre los mecanismos de fosilización de la Cova de sa Bassa Blanca y su paralelismo con formaciones marinas del Cuaternario. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 19: 11-28.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1986): On the interest of speleochronological studies in karstified islands. The case of Mallorca (Spain). *Com. 9º Cong. Int. Espeleol.*, 1: 297-300. Barcelona.

GINÉS, A.; GINÉS, J.; FORNÓS, J.J. & TUCCIMEI, P. (1999): Dataciones isotópicas de espeleotemas procedentes de cuevas costeras de Mallorca. Estado actual de las investigaciones. In: ANDREO, B.; CARRASCO, F. & DURÁN, J.J. (eds.) *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico*. Patronato de la Cueva de Nerja. 143-152. Nerja, Málaga.

GINÉS, A.; GINÉS, J. & POMAR, L. (1981a): Phreatic speleothems in coastal caves of Majorca (Spain) as indicators of Mediterranean Pleistocene paleolevels. *Proc. 8th Int. Congress Speleol.*, 2: 533-536. Bowling Green, U.S.A.

GINÉS, A.; GINÉS, J. & PONS-MOYÀ, J. (1975): Nuevas aportaciones al conocimiento morfológico y cronológico de las cavernas costeras mallorquinas. *Speleon. Monografía I, V Symposium de Espeleología, Cuaternario*. Escola Catalana d'Espeleologia. 49-56. Barcelona.

- GINÉS, J. (2000): *El karst litoral en el levante de Mallorca: una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología*. Tesis Doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. 595 pp + 29 làms. Inèdit.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (1993): Dataciones isotópicas de espeleotemas freáticos recolectados en cuevas costeras de Mallorca (España). *Endins*, 19: 9-15.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (1995): Aspectes espeleocronològics del carst de Mallorca / Speleochronological aspects of karst in Mallorca. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (eds.) *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. *Endins*, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 99-112. Palma.
- GINÉS, J.; FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (2005): Els espeleotemes freàtics del Quaternari de Mallorca: aspectes morfològics, mineralògics i cristal·logràfics. In: SANJAUME, E. & MATEU, J.F. (eds.) *Geomorfologia litoral i Quaternari. Homenatge al professor Vicenç M. Rosselló i Verger*. Universitat de València. 151-165. València.
- GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & TUCCIMEI, P. (2007): 2.7. Endokarst costero, niveles marinos y tectónica: el ejemplo de la costa oriental de Mallorca. In: FORNÓS, J.J.; GINÉS, J. & GÓMEZ-PUJOL, L. (eds.) *Geomorfologia litoral: Migjorn y Llevant de Mallorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 15: 201-220. Palma.
- GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; MERINO, A. & GRÀCIA, F. (2009): On the role of hypogene speleogenesis in shaping the coastal endokarst of southern Mallorca (Western Mediterranean). In: KLIMCHOUK, A.B. & FORD, D.C. (eds.) *Hypogene speleogenesis and karst hydrogeology of artesian basins*. Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, Special Paper 1: 91-99. Simferopol, Ucraïna.
- GINÉS, J.; GINÉS, A. & POMAR, L. (1981b): Morphological and mineralogical features of phreatic speleothems occurring in coastal caves of Majorca (Spain). *Proc. 8th Int. Congress Speleol.*, 2: 529-532. Bowling Green, U.S.A.
- GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; LANDRETH, R.; VICENS, D. & WATKINSON, P. (2001): Evidències geomorfològiques dels canvis del nivell marí. In: PONS, G.X. & GUIJARRO, J.A. (eds.) *El canvi climàtic: passat, present i futur*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 9: 91-119. Palma.
- GRÀCIA, F.; GAMUNDÍ, P.; CLAMOR, B.; TRIAS, M.; FORNÓS, J.J.; FEBRER, M. & POCOVÍ, J. (2010): Noves aportacions a l'estudi de les cavitats de Cala Falcò - Cala Varques (Mancor, Mallorca). *Endins*, 34: 141-154.
- GRÜN, R. (1985): *Beiträge zur ESR-Datierung*. Geologisches Institut der Universität zu Köln. Sonderveröffentlichungen, 59. 157 pp. Colònia, Alemanya.
- GRÜN, R. (1986): ESR-dating of a flowstone core from Cova de sa Bassa Blanca (Mallorca, Spain). *Endins*, 12: 19-23.
- HENNIG, G.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J. & POMAR, L. (1981): Avance de los resultados obtenidos mediante datación isotópica de algunos espeleotemas subacuáticos mallorquines. *Endins*, 8: 91-93.
- HODGE, E.J. (2004): *Palaeoclimate of the Western Mediterranean region: results from speleothems*. Ph. D. Thesis. University of Bristol. 246 pp. Inèdit.
- HODGE, E.J.; RICHARDS, D.A.; SMART, P.L.; GINÉS, A. & MATTEY, D.P. (2008): Sub-millennial climate shifts in the western Mediterranean during the last glacial period recorded in a speleothem from Mallorca, Spain. *Journal of Quaternary Science*, 23 (8): 713-718.
- MATEU, G.; COLOM, G. & CUERDA, J. (1979): Los foraminíferos plio-pleistocénicos de la isla de Cabrera (Balears) y las condiciones paleoecológicas del antiguo mar balear (contribución a su conocimiento). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 23: 51-68.
- MONTORIOL-POUS, J. (1961): El karst de la isla de Cabrera. *Speleon*, 12 (1-2): 5-34.
- MONTORIOL-POUS, J. (1972): Estudio de una captura kárstico-marina en la isla de Cabrera. *Acta Geológica Hispánica*, 6 (4): 89-91.
- MONTORIOL-POUS, J. & TERMES, F. (1965): Les grottes de l'île de Formentera (Baléares) et leurs relations avec les oscillations de la Méditerranée. *Compte Rendu IV Colloque International de Spéléologie, Athènes 1963*. 180-194. Atenes.
- MOYÀ-SOLÀ, S. & PONS-MOYÀ, J. (1979): Catálogo de los yacimientos con fauna de vertebrados del Plioceno, Pleistoceno y Holoceno de las Baleares. *Endins*, 5-6: 59-74.
- MOYÀ-SOLÀ, S.; KÖHLER, M.; ALBA, D.M. & PONS-MOYÀ, J. (2007): El significado de *Myotragus batei* y *M. binigausensis* en la evolución del género *Myotragus* (Bovidae, Mammalia) en las islas Baleares. In: PONS, G.X. & VICENS, D. (eds.) *Geomorfologia litoral i Quaternari. Homenatge a Joan Cuerva Barceló*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 14: 155-180. Palma.
- POMAR, L., GINÉS, A. & FONTARNAU, R. (1976): Las cristalizaciones freáticas. *Endins*, 3: 3-25.
- POMAR, L.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (1979): Morfología, estructura y origen de los espeleotemas epiaquáticos. *Endins*, 5-6: 3-17.
- POMAR, L.; RODRÍGUEZ-PEREA, A.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; FONT, A. & MORA, A. (1987): Phreatic speleothems in coastal caves: a new method to determine sea-level fluctuations. In: ZAZO, C. (ed.) *Late Quaternary sea level changes in Spain*. Museo Nacional de Ciencias Naturales C.S.I.C. Trabajos sobre Neógeno-Cuaternario, 10: 197-224. Madrid.
- PONS-MOYÀ, J.; MOYÀ-SOLÀ, S. & KOPPER, J.S. (1979): La fauna de mamíferos de la Cova de Canet (Esporles) y su cronología. *Endins*, 5-6: 55-58.
- QUINTANA, J. & ARNAU, P. (2004): Descripció dels rastres i les petjades d'*Hypnomys* Bate, 1918 (Mammalia: Gliridae) de la Cova de sa Duna (Alaior, Menorca). *Endins*, 26: 7-14.
- ROBLEDÓ, P.A. (2005): *Los paleocolapsos kársticos en las plataformas carbonatadas del Mioceno superior de Mallorca: análisis geográfico, genético, geológico y evolutivo*. Tesis Doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. 359 pp. Inèdit.
- ROBLEDÓ, P.A. & POMAR, L. (2000): Upper Miocene karst collapse structures of the East coast, Mallorca, Spain. *Acta Carsologica*, 29 (2): 177-184.
- TRIAS, M.; ESPINAR, M. & BOSCH, J.R. (1990): L'Avenc de Fra Rafel (Escorca, Mallorca). *Endins*, 16: 11-15.
- TUCCIMEI, P.; GINÉS, J.; DELITALA, C.; PAZZELLI, L.; TADDEUCCI, A.; CLAMOR, B.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & GRÀCIA, F. (2000): Dataciones Th/U de espeleotemas freáticos recolectados a cotas inferiores al actual nivel marino en cuevas costeras de Mallorca (España). Aportaciones a la construcción de una curva eustática detallada de los últimos 300 ka para el Mediterráneo occidental. *Endins*, 23: 59-71.
- TUCCIMEI, P.; GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J. & VESICA, P.L. (1998): Dataciones Th/U de espeleotemas freáticos controlados por el nivel marino, procedentes de cuevas costeras de Mallorca (España). *Endins*, 22: 99-107.
- TUCCIMEI, P.; GINÉS, J.; DELITALA, C.; GINÉS, A.; GRÀCIA, F.; FORNÓS, J.J. & TADDEUCCI, A. (2006): Last interglacial sea level changes in Mallorca island (Western Mediterranean). High precision U-series data from phreatic overgrowths on speleothems. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 50 (1): 1-21.
- TUCCIMEI, P.; SOLIGO, M.; GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; KRAMERS, J. & VILLA, I.M. (2010): Constraining Holocene sea levels using U-Th ages of phreatic overgrowths on speleothems from coastal caves in Mallorca (Western Mediterranean). *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 (7): 782-790.
- TUCCIMEI, P.; VAN STRYDONCK, M.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; SOLIGO, M.; VILLA, I.M. & FORNÓS, J.J. (2011): Comparison of <sup>14</sup>C and U-Th ages of two Holocene phreatic overgrowths on speleothems from Mallorca (Western Mediterranean): Environmental implications. *International Journal of Speleology*, 40 (1): 1-8.
- VESICA, P.L.; TUCCIMEI, P.; TURI, B.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (2000): Late Pleistocene paleoclimates and sea-level change in the Mediterranean as inferred from stable isotope and U-series studies of overgrowths on speleothems, Mallorca, Spain. *Quaternary Science Reviews*, 19: 865-879.